

УДК 621.317.799:511.1

**И.А. Тихомиров, В.А. Власов, В.Ф. Мышкин, А.Я. Отт**

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ**

Представлены результаты экспериментальных исследований дисперсной фазы химически активной плазмы. Получена микроструктура аэрозоля по высоте пламени различных пиротехнических составов.

Гранулометрический состав конденсированной дисперсной фазы (КДФ) оказывает существенное влияние на перенос оптического излучения, распределение зарядов по объему плазмы и их подвижность, на физико-химические процессы химически активной плазмы. В связи с этим при разработке источника накачки лазера, использующего оптическое излучение, возникающее при химических реакциях в плазме горения пиротехнических составов (ПТС), важно знать гранулометрический состав КДФ. При использовании энергии реакций окисления магния и алюминия наиболее подходящими являются оптические методы диагностики, т.к. позволяют проводить безотборный анализ в реальном масштабе времени. Методы диагностики с отбором проб имеют значительную погрешность, связанную с наличием высокой температуры и химическими превращениями по объему плазмы.

Для диагностики дисперсности КДФ плазмы горения ПТС был собран экспериментальный стенд, состоящий из: генератора плазмы (ГП), оптической системы выделения и передачи рассеянного излучения, источников зондирующего излучения, аппаратуры преобразования, запоминания и документирования значений интенсивностей рассеянных на различных углах излучений. ГП представляет собой два соосных цилиндра, установленных на горизонтальной площадке, которая может перемещаться вертикально. Внутренний цилиндр ГП служил для фиксации образца ПТС, внешний – для формирования направленного потока плазмы.

Оптическая система выделения рассеянных излучений состояла из групп световодов, уложенных в кронштейны, которые жестко крепились к рабочему столу. На каждый световод устанавливались индивидуально: диафрагма диаметром 0,5 мм, микролинза оптической силой 2:1, полосовой, серый, а при слабых интенсивностях – интерференционные фильтры. Выделялись: индикатрисы рассеяния в диапазонах углов 0,5–2,5°; 5–175°; 177,5–180°, оптическая плотность плазмы на линиях генерации аргонового, гелий-неонового, неодимового лазеров. Малоугловое рассеяние выделялось с помощью линзы с фокусным

расстоянием 1 м, расположенной так, чтобы в передней фокальной плоскости находился счетный объем, в задней – линейка световодов. Полная индикатриса выделялась с помощью световодов, расположенных в кронштейне, имеющем форму дуги с внутренним радиусом 250 мм. Обратное рассеяние отделялось от падающего излучения светоделительной пластиной и при помощи линзы с фокусным расстоянием 150 мм проецировалось на линейку световодов. Для определения спектра пропускания излучения лазеров под небольшими углами пересекались в счетном объеме, проходили расстояние 3–4 м, фокусировались линзами с фокусным расстоянием 50 мм на диафрагмы диаметром 1 мм, за которыми располагались световоды.

Все линейки световодов располагались в одной плоскости, а выходные концы световодов – в оптическом разьеме, в ответной части которого находились фотодиоды ФД-10Г. Регистрация сигналов фотодиодов, пропорциональных интенсивностям рассеянных излучений, осуществлялась с помощью блока оперативной памяти. В основу работы блока памяти положен принцип одновременного запоминания за время  $15 \pm 2,5$  нс по 16 информационным входам и их последовательного оцифровывания с частотой 4 кГц. Вся регистрирующая и документирующая аппаратура располагалась в металлическом боксе. Это позволило полностью избавиться от электромагнитных помех.

Путем проведения калибровочных экспериментов с помощью источников излучения, излучающих равномерно во все стороны и помещенных в счетный объем, была определена погрешность регистрации световых потоков по различным каналам – менее 3,5%. Анализ воздействия случайных факторов, таких как случайные флуктуации оси факела, перезасветки при больших интенсивностях в световодах, показал, что суммарная экспериментальная погрешность составляет величину порядка 15–20%.

Экспериментально исследовались образцы ПТС, содержащие магний – до 30%, алюминий – 20%, с добавками нитратов щелочных и щелочноземельных металлов. Диаметр образца составлял 20 мм, высота 70 мм.

Начало регистрации привязывалось к моменту воспламенения ПТС – возникновения плазменного потока. Регистрация параметров с частотой, устанавливаемой в зависимости от интенсивности горения, осуществлялась синхронно с генерацией лазера ИЛТИ-406. При регистрации 64 временных отсчетов блок оперативной памяти прекращал оцифровку входных сигналов и выдавал сигнал останова. В дальнейшем содержимое памяти просматривалось по отдельным кадрам или в режиме «кино» по всем кадрам на экране осциллографа. Информативные кадры выводились на цифрочепать, самописец.

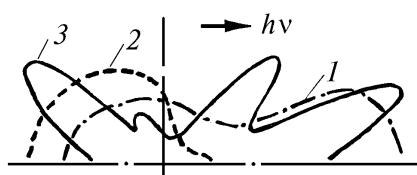


Рис. 1. Типичные формы индикатрис рассеяния: 1 – «гантель»; 2 – «груша»; 3 – «ромашка»

Экспериментально были зарегистрированы малоугловая, полная индикатрисы, обратное рассеяние, спектр поглощения по различным сечениям оси вдоль потока. Спектры поглощения имеют вид как спадающей, так и восходящей кривой с увеличением длины волны кривой в рассматриваемом спектральном интервале. Причем оптические плотности аэрозольного потока могут достигать величины 3, в зависимости от рецептуры испытуемого образца. Из всего разнообразия форм индикатрис можно выделить три характерных типа: «гантель» – вытянутая вперед-назад, плавной формы с минимумами рассеяния  $110\text{--}140^\circ$ , «груша» – с максимумом рассеяния в заднюю полусферу и «ромашка» – система минимумов и максимумов с перепадом интенсивностей до 10 раз при изменении угла на  $10\text{--}20^\circ$ , соответствующие разным рецептурам (рис. 1). Горение каждого образца одной рецептуры имеет индивидуальный характер, что подтверждается временным ходом оптической плотности свечения. Для каждой рецептуры все экспериментально регистрируемые параметры имеют средние значения, относительно которого происходят флуктуации. Замечена корреляция оптической плотности с интенсивностью собственного свечения. Скорость уноса продуктов сгорания составляет  $5\text{--}15$  мс в режиме свободного го-

рения и зависит от количества газообразных продуктов и модальных размеров КДФ.

Для обработки экспериментальных данных использовалась программа «Спектр», разработанная в ИОА СО РАН, и «RestSize», разработанная в ТПУ, в которых используются регуляризирующие алгоритмы. Так как априори не известно значение комплексного показателя преломления, то приходилось также проводить по нему оптимизацию. Диапазон изменения показателя преломления составлял  $1,5\text{--}2$ , а показателя поглощения –  $0,01\text{--}0,5$ . Путем проведения тестовых задач было установлено, что для рассматриваемых экспериментов «Спектр» может уверенно восстанавливать положение мод при двухмодальном распределении по размерам и оценить соотношение их амплитуд.

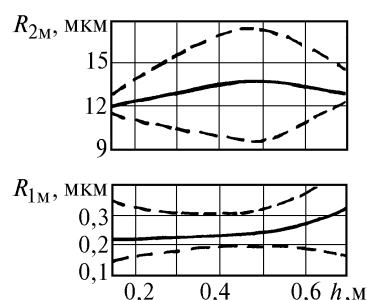


Рис. 2. Положения модальных размеров аэрозоля по высоте факела

На рис. 2. приведены типичные кривые изменения модальных размеров вдоль факела горения. Относительно средней кривой группировались  $60\text{--}70\%$  экспериментальных данных. Пунктирной линией показан диапазон, в который укладываются все значения модальных размеров в данном сечении. Соотношения ширины распределения в начале и конце факела, характера изменений и величины диапазона возможных значений модельных радиусов вдоль оси потока зависят от рецептуры состава. Для всех испытанных рецептур модальные размеры находились в интервалах  $0,1\text{--}0,8$  и  $5\text{--}20$  мкм.

В средней части факела горения ПТС, где происходят наиболее интенсивные химические реакции, диапазон наблюдаемых значений модальных размеров увеличивается по сравнению с начальным в  $4\text{--}10$  раз. Изменение общей ширины распределения, т.е. сближения или удаления мод, при увеличении высоты зондирования от поверхности ПТС коррелируется с рецептурой.